

## Konzept für einen simulationsgestützten Betrieb von autonomen Indoor-Flugrobotern

# Simulationsgestützter Betrieb von Indoor-Flugrobotern

T. von Bergen, L. Klingel, C. Hert, F. Jaensch, S. Röck, A. Verl

Dieser Beitrag präsentiert ein Konzept für den simulationsgestützten Betrieb von Flugrobotern im dynamischen Produktionsumfeld einer wandlungsfähigen Fabrik. Zentrale Bedeutung wird dabei dem digitalen Zwilling beigemessen, der ein Umgebungsmodell inklusive Realdatenanbindung bereitstellt. Darauf basierend können Dienste implementiert werden, die den Betrieb eines Flugroboters unterstützen, beispielsweise zur Lokalisierung, Bahnplanung oder Mensch-Flugroboter-Interaktion.

## Simulation-based operation of indoor flight robots

This paper presents an approach for the simulation-based operation of flight robots in the dynamic production environment of a flexible factory. An important role is assigned to the digital twin, which provides an environment model including real data connection. Based on this, services can be implemented supporting the operation of a flight robot, e.g. for localization, path planning or human-robot interaction.

### STICHWÖRTER

Industrie 4.0, Digitalisierung, Simulation

## 1 Motivation

Die stetig wachsende Nachfrage nach kundenspezifisch individualisierten Produkten und ein steigender Preisdruck stellen vor allem Produzenten in Hochlohnländern vor Probleme [1]. Um dem zu begegnen, ist es notwendig, Produktionen flexibler und effizienter zu gestalten, sodass auch individualisierte Produkte in geringerer Losgröße wirtschaftlich gefertigt werden können. Ein großes Einsparungspotenzial liegt in der Überführung klassischer Materialflussprozesse in ein hochflexibles Intralogistiksystem. Bereits etablierte Systeme im Bereich der flexiblen Intralogistik sind fahrerlose Transportssysteme (FTS) [2]. Wesentliche Nachteile der in der Regel bodengebundenen Fahrzeuge sind die Notwendigkeit einer raumfordernden und sicherheitskritischen Wegführung sowie hohe Anforderungen an die Bodenbeschaffenheit, was die Flexibilität einschränkt.

Alternativ kommen autonome Flugroboter für die Intralogistik einer wandlungsfähigen Fabrik infrage. Industrieunternehmen führen bereits Pilotprojekte zum Transport von Kleinteilen mit Flugrobotern durch, sowohl im Außen- [3, 4] als auch im Innenbereich [5]. Als Flugroboter werden Multikopter verwendet, die durch vier oder mehr Rotoren angetrieben werden. Die Flugbewegungen können im ungenutzten Luftraum der Produktionsstätten erfolgen, sodass keine baulichen Veränderungen oder Anpassungen erforderlich sind. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der hohen Dynamik, die Multikopter bieten. Durch direkte Luftwege lässt sich eine deutliche Verringerung der Zustellzeiten von Werkstücken erreichen. Dieser Beitrag fasst die Herausforderungen beim Betrieb autonomer Indoor-Flugroboter in einer wand-

lungsfähigen Fabrik zusammen und diskutiert einen möglichen Lösungsansatz für einen simulationsgestützten Betrieb.

## 2 Herausforderungen

Der Einsatz von autonomen Flugrobotern im dynamischen Produktionsumfeld einer wandlungsfähigen Fabrik erfordert ein komplexes Gesamtsystem und birgt eine Reihe von Herausforderungen. Diese sind im Folgenden kategorisiert dargestellt.

- Umgebungsmodell: Für den autonomen Betrieb eines Flugroboters wird ein geometrisches Umgebungsmodell (Karte), die aktuelle Position des Flugroboters sowie ein geeigneter Algorithmus zur Bahnplanung (Navigation) benötigt. Die Generierung des Umgebungsmodells ist dabei eine besondere Herausforderung. Bei der Synchronous-Localization-and-Mapping (SLAM)-Methode [6] wird die Umgebung sensorisch vom Flugroboter erfasst und eine Umgebungskarte zur Positionsbestimmung und Navigation aus den vorhandenen Informationen berechnet. Zur Erfassung der räumlichen Umgebung wird eine aufwendige bildgebende Sensorik, wie etwa Laserscanner oder Tiefenbildkameras, benötigt. Daraus folgen Nachteile wie hohe Kosten, hohes Gewicht, hoher Bedarf an Rechenleistung und ein resultierender erhöhter Energiebedarf auf dem Flugroboter. Als Alternative zur SLAM-Methode können auch a priori erstellte Karten als Umgebungsmodell verwendet werden. Jedoch müssen Veränderungen im Umgebungsmodell, beispielsweise durch bewegte Maschinenteile oder Menschen, erfasst und berücksichtigt werden. Dazu muss das Umgebungsmodell permanent in Echtzeit auf die reale Umgebung synchronisiert und die Position des Flugroboters bestimmt sein. Die Positionsbe-

stimmung des Flugroboters kann mit einfacher Abstands- und Inertialmessung erfolgen, die im Vergleich mit der SLAM-Methode eine wesentlich einfachere und energiesparendere Sensorik erforderlich macht.

- Bahnplanung und Kollisionsvermeidung: Die Hauptfunktion einer Bahnplanung ist es, eine möglichst optimale Route zwischen einem definierten Start- und Zielpunkt zu berechnen. Im Kontext der Indoor-Flugrobotik ist eine optimale Route möglichst kurz, energieeffizient und frei von Wartezeiten, um die vorhandene Akkukapazität möglichst effizient zu nutzen. Zusätzlich ist es Aufgabe des Bahnplanungsalgorithmus, einen sicheren Betrieb des Flugroboters im dynamischen Umfeld einer flexiblen Fertigung sicherzustellen. Kritische Situationen, die ein hohes Kollisionsrisiko in sich bergen, wie beispielsweise das zeitgleiche Durchfliegen einer Engstelle mit mehreren Flugrobotern, sollten bereits durch die Bahnplanung vermieden werden. Zur Kollisionsvermeidung muss es möglich sein, die Bahn in Echtzeit an die sich verändernde Umgebung anzupassen, was besondere Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit und Robustheit der Bahnplanungsalgorithmen stellt.
- Mensch-Roboter-Interaktion: Besonders, wenn sich Menschen im Arbeitsraum der Flugroboter aufhalten, ist eine echtzeitfähige Kollisionsvermeidung nötig, um die funktionale Sicherheit zu gewährleisten. Ein effizienter Einsatz von Flugrobotern, beispielsweise in der Montage, macht eine Kollaboration mit Menschen erforderlich, sodass diese individuell und flexibel mit Teilen versorgt werden können. Um Menschen effizient in der Bahnplanung berücksichtigen zu können, müssen deren Bewegungen zuverlässig erfasst und im Umgebungsmodell modelliert werden. Dabei liegt die Herausforderung in der Unvorhersehbarkeit, Vielseitigkeit und Dynamik menschlicher Bewegungsabläufe. Dies erschwert die Modellierung und Prädiktion des Bahnverlaufs erheblich.
- Auslegung für den Lastentransport: Voraussetzung für den Einsatz von Flugrobotern als Handhabungsgeräte in der Intralogistik ist die Fähigkeit, Bauteile aufzunehmen, transportieren und ablegen zu können. Große Herausforderungen entstehen bei der Auslegung der Flugroboter für den sicheren Lastentransport sowie dem zuverlässigen Greifen von Bauteilen. Verglichen mit einem stationären Handhabungssystem ist eine ausreichend gute Positionier- und Wiederholgenauigkeit bei Flugrobotern sehr viel schwieriger zu erreichen. Außerdem muss bei der Aufnahme von Lasten eine mögliche Schwerpunktverlagerung besonders berücksichtigt werden, da diese Einfluss auf die Flugdynamik und damit auf den sicheren Betrieb des Flugroboters hat.
- Simulationsgestützte Entwicklung: Die Erprobung und Inbetriebnahme am realen Flugroboter ist nur in abgesicherten, meist großen Räumen möglich und erfordert viel Zeit und Materialeinsatz. Daher ist eine simulationsgestützte Entwicklung unerlässlich. Moderne Simulationsmethoden ermöglichen die frühzeitige und risikolose Erprobung und Validierung der Funktionsfähigkeit einer Flugroboterapplikation. So lässt sich die kollisionsfreie Bahnplanung oder der reibungslose Ablauf der Intralogistikaufgaben bereits vorab untersuchen. Komplexe Abläufe lassen sich gefahrlos analysieren und optimieren, bevor sie in der realen Fabrik umgesetzt werden. Allerdings muss eine geeignete Modell- und Simulationsumgebung zur Verfügung stehen, die eine möglichst präzise Vorhersage der realen Applikation erlaubt.

### 3 Stand der Forschung und Technik

Im Folgenden wird der Stand der Forschung und Technik zum simulationsgestützten Betrieb von Flugrobotern, also von Simulationswerkzeugen für Analyse und Test von Bahnsteuerungen und Routenoptimierungen, betrachtet. Zunächst wird auf Simulationsumgebungen speziell aus dem Bereich der Flugrobotik eingegangen. Anschließend werden Echtzeitsimulationsmethoden aus der Produktionstechnik sowie des Software-defined-Manufacturing-Ansatzes betrachtet, die als Enabler für das im nächsten Kapitel vorgestellte Konzept dienen können.

#### 3.1 Simulation in der Flugrobotik

Bei der Simulation von Flugrobotern geht der Trend verstärkt in Richtung von Open-Source-Plattformen [7]. Oft kommt das in der Robotik-Community sehr verbreitete Framework „ROS“ (Robot Operating System) in Kombination mit der Simulationsumgebung „Gazebo“ zum Einsatz, vergleiche [8–10]. Gazebo wird häufig als Grundlage für die Erstellung eines eigenen Simulationsframeworks genutzt, da das Rendering der Szene und die Physikberechnungen bereits implementiert sind und Anpassungen für den eigenen Anwendungsfall vergleichsweise einfach vorgenommen werden können. ROS dient dabei als Schnittstelle zur Simulationsumgebung, über die der Anwender Algorithmen zur Steuerung des simulierten Flugroboters implementieren kann.

*Song et al.* veröffentlichten das Framework „Flightmare“ [11], bei dem die Physics-Engine und die Rendering-Engine unabhängig voneinander lauffähig implementiert wurden. Der Endnutzer kann so die Genauigkeit der Physiksimulation und den Detailgrad der Rendering-Szene seinem Anwendungsfall anpassen.

Die Simulatoren „Microsoft AirSim“ und „PX4 jMAVSIM“ erlauben eine Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation, bei der eine reale Flugsteuerung in den Simulationsprozess eingebunden wird [12]. Jedoch ist diese Funktion nur für ausgewählte Flugsteuerungen implementiert. Durch eine HiL-Simulation lassen sich reproduzierbare Testszenarien erzeugen und aufwendige Testläufe am realen System deutlich reduzieren [13]. Außerdem sind gefahrlose Tests an den Systemgrenzen durchführbar. Neben einer HiL-Simulation besteht auch die Möglichkeit, eine Software-in-the-Loop (SiL)-Simulation durchzuführen, wobei die Funktionalität der Flugsteuerung durch Softwarefunktionen nachgebildet wird [14].

*Fathoni et al.* beschreiben in [15] eine echtzeitfähige Simulation von Flugrobotern zur Modellierung eines Drohnen-Schwams. Jede Instanz des Schwams wird in einer eigenen virtuellen Maschine simuliert. Ansätze zur echtzeitfähigen Simulation von Flugrobotern wurden bislang wenig untersucht.

#### 3.2 Echtzeitsimulation in der industriellen Produktionstechnik

Bei der simulationsbasierten Entwicklung und Validierung von Steuerungsprogrammen für Produktionssysteme ist die HiL-Simulation seit vielen Jahren eine etablierte Methode [16]. Diese wird zur virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) [17] genutzt, um ein Steuerungssystem gegen ein virtuelles Modell eines Produktionsystems zu testen. Dabei werden hohe Echtzeitanforderungen an die Simulationsumgebung gestellt [18], da die Simulation über den realen Feldbus mit dem Steuerungssystem gekoppelt ist.

Erste Ansätze für den Einsatz von Flugrobotern in einem Fabrikumfeld nutzen für die Bahnsteuerung des Flugroboters industrielle Steuerungssysteme und folglich auch die entsprechende HiL-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. Von Bergen *et al.* präsentieren in [18] einen cloudbasierten Simulationsansatz, der eine echtzeitnahe Simulation mehrerer Flugroboter in einer virtuellen Umgebung ermöglicht. **Bild 1** zeigt den HiL-Simulationsaufbau mit mehreren Flugsteuerungen, die auf Industriesteuerungen der Firma Beckhoff implementiert wurden.

Zur Simulation der Flugroboterdynamik wurde das Echtzeit-simulationstool „ISG-virtuos“ genutzt. Über eine am Virtual Automation Lab (VAL) entwickelte Edge-Cloud wird ein digitales Abbild der Flugroboterszene den Steuerungen echtzeitnah bereitgestellt und visualisiert. In dieser Simulationsumgebung erprobte Huptych in [19] einen neuartigen Bahnplanungsalgorithmus für mehrere Flugroboter in veränderlichen Umgebungen auf seine Industrietauglichkeit und Robustheit.

Als Erweiterung der HiL-Simulation stellen Schnierle und Röck in [20] die Mixed-Reality-in-the-Loop (MRiL)-Simulation vor. Die MRiL-Simulation erlaubt durch den Einsatz von modernen Mixed-Reality-Technologien die Integration des Menschen und realer Anlagenteile in einen HiL-Simulationsprozess.

### 3.3 Der digitale Zwillings und der Software-defined-Manufacturing-Ansatz

In der Literatur wird oft der Begriff des digitalen Zwilling als Synonym für ein Simulationsmodell in der VIBN verwendet, jedoch etabliert sich zunehmend die Perspektive von Kritzinger *et al.* in [21], die den digitalen Zwillings weniger über den konkreten Aufbau und die Komplexität beschreibt, sondern über den Einsatzzweck und die Anbindung an den realen Zwillings. Das bedeutet, ein digitaler Zwillings bildet ein reales System nicht nur ab, sondern stellt in einer nicht näher definierten Form auch Services bereit, um Einfluss auf das reale System zu nehmen.

Aktuelle Entwicklungen für flexible Produktionssysteme integrieren den simulativen Aspekt des digitalen Zwilling zur direkten Absicherung jeder Änderung des Produktionssystems. Dabei wird angestrebt das komplette Produktionssystem (Produkt, Prozess, Ressource) in Form eines Simulationsmodells virtuell jederzeit verfügbar zu haben. Jede Anpassung der Software oder Hardware kann damit im Betrieb vorab simuliert und getestet werden, bevor der Prozess am realen Produktionssystem angestoßen wird [22]. Dieser Software-defined-Manufacturing-Ansatz soll in dem folgenden Konzept für die Flugrobotik aufgegriffen werden.

## 4 Konzept für einen simulationsgestützten Betrieb von Flugrobotern

Durch die digitale Transformation im Kontext Industrie 4.0 gehen bereits während des Engineeringprozesses kinematisierte Geometriemodelle (CAD-basierte Kinematikmodelle) der einzelnen Maschinen für die virtuelle Inbetriebnahme der Steuerungssysteme hervor. Diese Modelle in Kombination mit einer Anbindung an Realdaten (Steuerungssollwerte und/oder Sensoristwerte) liefern die Grundlage zur Erstellung eines digitalen Zwilling der wandlungsfähigen Fabrik. Der digitale Zwillings fügt die Simulationsmodelle der einzelnen Maschinen und Anlagen zur Gesamtszene zusammen.



**Bild 1.** Hardware-in-the-Loop-Simulationsaufbau mit drei Flugsteuerungen (1-3), VAL-Edge-Cloud-Server (links) und VAL-3D-WebStudio (oben).  
Foto: VAL Hochschule Esslingen

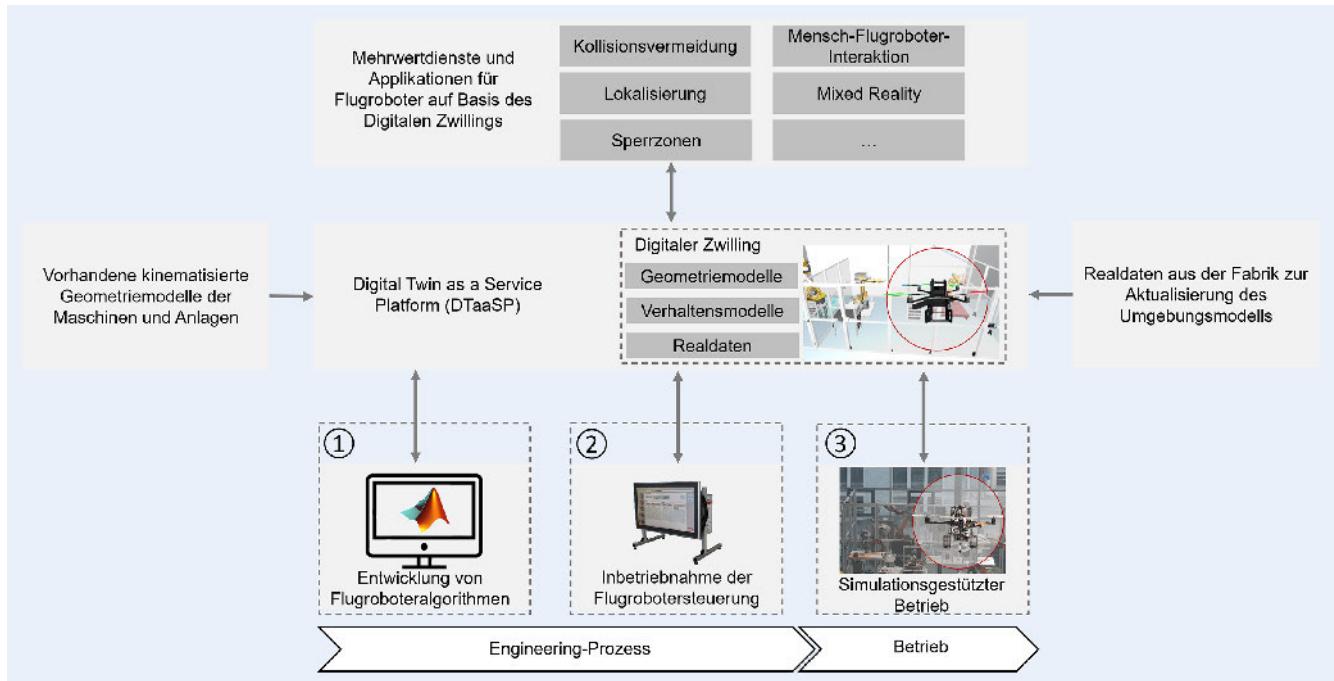
Um das Potenzial des digitalen Zwilling volumäglich zu nutzen, muss dessen breite Verfügbarkeit sichergestellt werden. Es wird eine cloudbasierte Lösung vorgeschlagen, die den digitalen Zwillings in Form eines Service bereitstellt. Der Service soll die Realdaten aller Steuerungen und Sensoren der Maschinen und Anlagen (reale Assets) über standardisierte Schnittstellen anbinden und gleichzeitig eine zentrale Verfügbarkeit des digitalen Zwilling über Cloud- und Webtechnologien sicherstellen. Diesen Ansatz greift die von Schnierle *et al.* [23] vorgestellte Digital Twin as a Service Platform (DTaaSP) auf. Die in **Bild 2** dargestellte DTaaSP führt die Modelle unterschiedlicher Maschinen und Anlagen in einem digitalen Zwillings zusammen und ermöglicht die Anbindung von Realdaten der realen Assets (realer Zwillings).

Das Verhalten der Flugroboter kann direkt in der DTaaSP modelliert oder über externe Simulationsumgebungen (virtuelle Assets), analog zu den realen Assets, eingebunden werden. Durch die zentrale Zusammenführung der Realdaten unterschiedlicher realer und virtueller Assets in einer Simulationsszene ermöglicht die DTaaSP eine umfangreiche Auslegungs-, Inbetriebnahme- und Betriebsumgebung für komplexe Flugroboterapplikationen.

In Bild 2 soll dies verdeutlicht werden. Während der Entwicklung (1) und Inbetriebnahme (2) dient der digitale Zwillings vor allem als Entwicklungsunterstützung und zur simulativen Absicherung der Flugroboterapplikation. Während des Betriebs (3) können auf dieser Grundlage unterschiedliche Mehrwertdienste bereitgestellt werden, die den Betrieb des realen Flugroboters unterstützen.

Einige Forschungsansätze und Ideen für mögliche Mehrwertdienste sind im Folgenden dargestellt:

- Lokalisierung mit dem digitalen Zwillings: Der digitale Zwillings der Flugroboterumgebung, die statische und dynamische Objekte umfasst, ersetzt eine sensorische Umgebungserkennung im Flugbetrieb (vergleiche SLAM). Da der digitale Zwillings mit Realdaten der Maschinen und Anlagen versorgt wird, sind zu jedem Zeitpunkt die Positionen aller Anlagenkomponenten bekannt. Durch Kombination des Modells mit einfachen Abstands- und Inertialmessungen kann die Position des Flugroboters bestimmt werden. Damit wird die auf dem Flugroboter mitgeführte Sensorik deutlich reduziert. Eine besonders energieeffiziente Lokalisierung kann erzielt werden, wenn die Anzahl der Abstandsmessungen auf ein Minimum reduziert wird. Um dies zu erreichen, wird derzeit am VAL an einem wahrscheinlichkeitsbasierten Ansatz (basierend auf der Monte-Car-



**Bild 2.** Digital Twin as a Service Platform (DTaaSP) zur simulationsgestützten Entwicklung (1) und Inbetriebnahme (2) sowie für den simulationsgestützten Betrieb (3) von komplexen Flugroboter-Applikationen. Grafik: VAL Hochschule Esslingen

Io-Lokalisierung) geforscht, der mithilfe eines Partikelfilters die Position eines Flugroboters auf Basis einer minimalen Anzahl von Abstandsmessungen schätzt.

- Kollisionsfreie Bahnplanung in veränderlichen Umgebungen: Für den sicheren Betrieb von Flugrobotern im dynamischen Umfeld einer wandlungsfähigen Fabrik ist eine Online-Bahnplanungsmethode nötig, die in Echtzeit auf dynamische Hindernisse reagieren kann. Zur Online-Bahnplanung wird die von *Huptych* in [19] beschriebene Kurvenflussmethode genutzt. Der Algorithmus diskretisiert die Flugbahn durch mehrere Stützstellen, welche unter dem Einfluss von Hindernissen verschoben werden können. Hindernisse in unmittelbarer Nähe der geplanten Flugbahn haben eine abstoßende Wirkung auf die Bahn, gleichzeitig wirken krümmungsproportionale Rückstellkräfte. Dadurch ergibt sich ein Gleichgewicht aus ausreichendem Hindernisabstand und geringer Bahnlänge. Die zur Anwendung der Methode benötigten Hindernispositionen liefert der digitale Zwilling. Vorteile gegenüber anderen Bahnplanungsalgorithmen sind vor allem Echtzeitfähigkeit, numerische Robustheit und eine hohe Recheneffizienz.
- Virtuelle Sperrzonen zur Einrichtung von Flugkorridoren: Die Verwendung des digitalen Zwillings ermöglicht es, neben der Repräsentation realer Hindernisse, die abgebildete Realität um virtuelle Sperrzonen anzureichern. Diese werden in Form von virtuellen Hindernissen eingefügt. Im Kontext der Kurvenflussmethode können diese zur Modellierung von Flugkorridoren dienen. Dadurch ist eine indirekte Beeinflussung und Manipulation von Flugbahnen möglich, ohne explizite Anpassungen im Bahnplanungsalgorithmus vorzunehmen. Die virtuellen Hindernisse können dabei zu jeder Zeit situativ angepasst werden.
- Mensch-Flugroboter-Interaktion: In der Flugrobotik ist die Berücksichtigung von Menschen bei der Bahnplanung und Kollisionsvermeidung von besonderer Bedeutung. Ein Aufenthalt in unmittelbarer Nähe des Flugroboters oder das Auftre-

ten einer Fehlfunktion bergen besonderes Gefahrenpotenzial. Deshalb müssen auch die Menschen in das Umgebungsmodell des digitalen Zwillings integriert werden. Über die Repräsentation des menschlichen Körpers kann eine Schutzzone als virtuelles Hindernis in Form einer umhüllenden Geometrie in die Online-Bahnplanung, etwa mit der Kurvenflussmethode, integriert werden. Die Schutzzone soll den Menschen zu jedem Zeitpunkt vollständig umgeben. Dazu müssen technologiebedingte Unsicherheiten bei der Positionsbestimmung laufend analysiert werden, sodass vor allem die Größe und gegebenenfalls auch die Form der Schutzzone angepasst werden kann.

- Informationsbereitstellung durch Mixed Reality: Der Aufenthalt im Arbeitsraum eines Flugroboters, beispielsweise bei Montageprozessen, wird bei den meisten Menschen zu Sicherheitsbedenken führen, da das Verhalten der Indoor-Flugroboter für diese nicht vorhersehbar ist. Aus diesem Grund kann mithilfe der von *Schnierle und Röck* [20] vorgestellten MRiL-Simulation unter Verwendung der DTaaSP die Bahnplanung des Flugroboters auf Augmented-Reality-Endgeräten zur Laufzeit visualisiert werden, sodass die momentanen Bahnverläufe für den Menschen jederzeit ersichtlich sind.

## 5 Fazit

Die Umsetzung des vorgestellten Konzeptes erfordert die Untersuchung zahlreicher Themen im Kontext eines Indoor-Flugroboter tauglichen digitalen Zwillings, der zum einen bestehende Systeme anbindet und zum anderen den digitalen Zwilling skalierbar zur Verfügung stellt. Zur Umsetzung eines echtzeitfähigen Gesamtsystems bestehen bereits Vorarbeiten aus dem Bereich der virtuellen Inbetriebnahme und des digitalen Zwillings, jedoch werden mit wachsender Komplexität und Größe einer wandlungsfähigen Fabrik weitere Untersuchungen notwendig. Weiterer Forschungsbedarf im Kontext der Flugrobotik besteht

vor allem im Bereich der Bahnplanung, Lokalisierung sowie der Mensch-Roboter-Interaktion im digitalen Zwilling.

Diese Forschungsthemen möchten das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungsmaschinen (ISW) der Universität Stuttgart sowie das Virtual Automation Lab (VAL) der Fakultät Maschinen und Systeme der Hochschule Esslingen zukünftig in gemeinsamen Forschungsprojekten vorantreiben.

## L i t e r a t u r

- [1] Bachert Unternehmensberatung: Maschinenbau: Strategien im „Post-Corona-Zeitalter.“ Stand: 2021. Internet: [www.bachert-partner.de/fileadmin/user\\_upload/inhaltsseiten/news/bp\\_whitepaper\\_maschinenbau.pdf](http://www.bachert-partner.de/fileadmin/user_upload/inhaltsseiten/news/bp_whitepaper_maschinenbau.pdf). Zugriff am 11.04.2022
- [2] Wurmann, P. R.; D'Andrea, R.; Mountz, M.: Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses. *AI Magazine* 29 (2008) 1, pp. 9–20
- [3] thyssenkrupp Steel Europe: Erfolgreicher Demonstrationsflug: Autonome Transportdrohne beschleunigt Anlieferung von Laborproben bei thyssenkrupp Steel um rund 70 Prozent. Stand: 2019. Internet: [www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/erfolgreicher-demonstrationsflug-der-autonomen-transportdrohne.html](http://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/erfolgreicher-demonstrationsflug-der-autonomen-transportdrohne.html). Zugriff am 11.04.2022
- [4] SEAT S.A.: SEAT liefert Fahrzeugteile per Drohne. Stand: 2019. Internet: [www.seat.de/ueber-seat/news/unternehmen/seat-liefert-fahrzeugteile-per-drohne.html](http://www.seat.de/ueber-seat/news/unternehmen/seat-liefert-fahrzeugteile-per-drohne.html). Zugriff am 11.04.2022
- [5] SEAT S.A.: Die Fabrik der Zukunft setzt auf Drohnen. Stand: 2021. Internet: [www.seat-mediacenter.de/smc/seat-sa/seat-sa-storiespage/die-fabrik-der-zukunft-setzt-auf-drohnen.html](http://www.seat-mediacenter.de/smc/seat-sa/seat-sa-storiespage/die-fabrik-der-zukunft-setzt-auf-drohnen.html). Zugriff am 11.04.2022
- [6] Alpen, M.; Willrodt, C.; Frick, K. et al.: On-board SLAM for indoor UAV using a laser range finder. *Proceedings SPIE* 7692, Unmanned Systems Technology XII, Orlando/Florida, United States, 2010, doi.org/10.1117/12.849984
- [7] Zhang, M.; Qin, H.; Lan, M. et al.: A high fidelity simulator for a quadrotor UAV using ROS and Gazebo. *IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2015*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 2846–2851
- [8] Schmittel, M.; Lukina, A.; Vacek, L. et al.: OpenUAV: A UAV Testbed for the CPS and Robotics Community. *ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs)*, Porto, Portugal, 2018, pp. 130–139
- [9] Chen, S.; Chen, H.; Zhou, W. et al.: End-to-End UAV Simulation for Visual SLAM and Navigation. Stand: 2020. Internet: [arxiv.org/pdf/2012.00298.pdf](http://arxiv.org/pdf/2012.00298.pdf). Zugriff am
- [10] Maghazei, O.; Netland, T. H.; Frauenberger, D. et al.: Automatic Drones for Factory Inspection: The Role of Virtual Simulation. In: Dolgui, A.; Bernard, A.; Lemoine, D. et al. (eds.): *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*. APMS 2021. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 633 (2021) pp. 457–464, doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7\_48
- [11] Song, Y.; Naji, S.; Kaufmann, E. et al.: Flightmare: A Flexible Quadrotor Simulator. Conference on Robot Learning 2020, Cambridge, Massachusetts, United States, 2020, pp. 1–11
- [12] Hentati, A. I.; Krichen, L.; Fourati, M. et al.: Simulation Tools, Environments and Frameworks for UAV Systems Performance Analysis. 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Limassol, Cyprus, 2018, pp. 1495–1500
- [13] Wandarosanza, R.; Trilaksono, B. R.; Hidayat, E.: Hardware-In-the-Loop Simulation of UAV hexacopter for Chemical Hazard monitoring mission. 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET) Bandung, Indonesia, 2016, pp. 189–193
- [14] Nguyen, K. D.; Nguyen, T.-T.: Vision-Based Software-in-the-Loop-Simulation for Unmanned Aerial Vehicles Using Gazebo and PX4 Open Source. *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE) 2019*, Dong Hoi, Vietnam, 2019, pp. 29–432
- [15] Fathoni, M. F.; Lee, S.; Kim, Y. et al.: Development of Multi-Quadrotor Simulator Based on Real-Time Hypervisor Systems. *Drones* 2021, 59 (2021) 5, pp. 1–20
- [16] Pritschow, G.; Röck, S.: “Hardware in the Loop” Simulation of Machine Tools. *CIRP Annals* 53 (2004) 1, pp. 295–298
- [17] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3693 Blatt 1: Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar. Berlin: Beuth Verlag 2016
- [18] von Bergen, T.; Huptych, M.; Röck, S.: Autonome Flugrobotik für die wandlungsfähige Fabrik – Steuerung, Infrastruktur und Simulation. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 11/12, S. 834–839. Internet: [www.werkstattstechnik.de](http://www.werkstattstechnik.de). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [19] Huptych, M.; Röck, S.: Real-time path planning in dynamic environments for unmanned aerial vehicles using the curve-shortening flow method. *International Journal of Advanced Robotic Systems* (2021) 1, pp. 1–16. doi:10.1177/1729881420968687
- [20] Schnierle, M.; Röck, S.: Plattform für die Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation – Ein Beitrag zur Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation als Erweiterung der X-in-the-Loop-Methodenreihe. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 9, S. 623–630. Internet: [www.werkstattstechnik.de](http://www.werkstattstechnik.de). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [21] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G. et al.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* (2018), pp. 1016–1022
- [22] Lechner, A.; Kircher, C.; Verl, A.: SDM – Software Defined Manufacturing. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 5, S. 307–312. Internet: [www.werkstattstechnik.de](http://www.werkstattstechnik.de). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [23] Schnierle, M.; Polak, C.; Röck, S.: Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer „Digital Twin as a Service“-Plattform. *atp magazin* 61 (2019) 5, S. 84–93



**T i m m v o n B e r g e n , M . S c .**  
Foto: HS Esslingen

**C h r i s t i a n H e r t , M . E n g .**

Prof. Dr.-Ing. **S a s c h a R ö c k**

Virtual Automation Lab (VAL) – Hochschule Esslingen  
Kanalstr. 33, 73728 Esslingen  
Tel. +49 711 / 397-3395  
[timm.von-bergen@hs-esslingen.de](mailto:timm.von-bergen@hs-esslingen.de)  
[www.virtual-automation-lab.de](http://www.virtual-automation-lab.de)

**L a r s K l i n g e l , M . S c .**

**F l o r i a n J a e n s c h , M . S c .**

Prof. Dr.-Ing. **A l e x a n d e r V e r l**

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)  
Universität Stuttgart  
Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart  
Tel. +49 711 / 685-82393  
[lars.klingel@isw.uni-stuttgart.de](mailto:lars.klingel@isw.uni-stuttgart.de)  
[www.isw.uni-stuttgart.de](http://www.isw.uni-stuttgart.de)